

L'evolució dels estudis solars (1905-2005)

Josep Lluís Ballester

Departament de Física
Universitat de les Illes Balears
07122 Palma de Mallorca

Resum: La Física Solar i l'Astrofísica en general han tingut durant els darrers cent cinquanta anys un fortíssim desenvolupament propiciat per la millora dels instruments d'observació i el desenvolupament de noves disciplines de la física com la mecànica quàntica, la relativitat i la física nuclear, que han permès la resolució de debats que es remuntaven a finals del segle XIX. En aquest article es fa un repàs a algunes de les investigacions més interessants de la Física Solar al llarg dels darrers cent anys, posant de manifest la seva contribució pionera en el desenvolupament de l'Astrofísica.

Summary: During the past two centuries, Solar Physics and Astrophysics have had a strong development due to the improvement of the observational facilities and to the growth of new physics subjects such as quantum mechanics, relativity, nuclear physics, etc, which have allowed to solve old remaining problems going back to the end of the nineteenth century. In this paper, we review the most interesting Solar Physics research along the last century, pointing out its pioneer contribution to the development of Astrophysics.

1

La Física Solar a finals del Segle XIX

Al llarg del segle XIX, i sota la influència de les investigacions sobre el Sol, l'astronomia va sofrir una autèntica revolució passant d'un tractament purament geomètric i mecànic (mida dels astres, distàncies, posicions al cel, etc.) a l'interès per conèixer i entendre els processos físics que tenen lloc a les estrelles en termes de lleis físiques. A començament del segle XIX, i degut a l'estudi de les propietats refractives dels vidres per part de Wollaston (1802) i Fraunhofer (1817), ja era coneguda l'existència de ratlles fosques a l'espectre del Sol. Anys després, Kirchhoff i Bunsen (1857) es van adonar que cada element químic es podia identificar mitjançant el conjunt de ratlles d'absorció a que donava lloc i començaren les primeres determinacions sistemàtiques d'elements químics al Sol utilitzant aquests coneixements. Posteriorment, Kirchhoff (1861, 1862) va construir els primers mapes de l'espectre solar i va suggerir que la superfície solar (fotosfera) era líquida, incandescent i emetia un espectre continu, i que les línies d'absorció

es produïen a l'atmosfera solar. Secchi (1864) suggeria al contrari que el Sol era gasós. Entre 1860 i 1920, es varen mesurar unes 20.000 línies de Fraunhofer i se'n varen identificar unes sis mil corresponents a uns cinquanta elements. A poc a poc, es varen anar descobrint nous elements químics a l'espectre del Sol: l'heli, que fou descobert per Lockyer a l'eclipsi total de 1868 (en aquell moment era un element desconegut a la Terra, després fou detectat a les erupcions del Vesubi de 1882 i trobat per Ramsay en un mineral a 1895); el carboni, descobert també per Lockyer a 1878; l'oxigen, descobert per Ramsay a 1897, etc.

En aquella època, Schwabe realitzava observacions del Sol tractant de detectar planetes intramercurials. Els resultats de les seves investigacions varen ser publicades a *Kosmos* (Humboldt, 1851) i varen servir per descobrir que el nombre de grups de taques solars entre 1826 i 1850 presentava un comportament cíclic amb un període d'onze anys. Posteriorment, a 1897 Young va posar de manifest l'existència d'una correlació entre un índex d'activitat solar (el nombre de Wolf) i l'índex d'activitat geomagnètica, donant lloc a l'inici dels estudis de la interacció Sol-Terra. Per una altra banda, al voltant de 1858, Carrington i Spörer establiren la llei de Spörer de migració de les taques solars des de latituds altes cap a l'equador al llarg del cicle d'activitat solar i, a partir de l'observació de les taques solars, Carrington va posar de manifest la rotació diferencial del Sol. Cap a finals del segle XIX, l'estudi de les taques solars va donar lloc a diferents teories sobre la seva naturalesa: Faye (1865) va suggerir que la fotosfera era l'atmosfera solar; i que les taques eren forats dels núvols fotosfèrics, és a dir, es podria veure l'interior del Sol! Més tard, les taques es varen considerar com a ciclons que duen els materials més freds cap al seu centre i es veuen fosques. Secchi (1870) i Lockyer (1886) varen suggerir que eren regions amb moviments de gas, i Young (1892) va cridar l'atenció sobre les evidències de duplicitat de les línies del ferro a l'espectre d'una taca solar. Finalment, Maunder va mostrar que el registre històric de l'activitat solar presentava un mínim pronunciat entre 1645 i 1715.

Un dels debats importants de la Física Solar del segle XIX era sobre el mecanisme de generació de l'energia solar. Waterson (1840) i Helmholtz (1854) varen suggerir que la lluminositat solar era generada per contracció gravitatòria. Aquesta teoria també era defensada per Kelvin qui va estimar que l'edat del Sol era de 30 milions d'anys; però a 1859, Darwin va estimar a partir dels estudis sobre l'erosió d'una vall que l'edat de la Terra era d'uns 300 milions d'anys. Per tant, existia una forta discrepància entre físics per

una banda, i geòlegs i biòlegs per una altra, que pensaven que es necessitaven cents de milions d'anys per als canvis geològics i l'evolució.

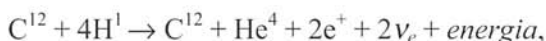
A principis del segle XX es coneixia o es creia que: *i)* La composició química del Sol era semblant a la de la Terra ja que ambdós cossos es varen formar per condensació des de la mateixa nebulosa; *ii)* el Sol radiava 7×10^{22} kilowatts; *iii)* la temperatura de la superfície era d'uns 6000 °C; *iv)* la seva velocitat de rotació era major a l'equador que als pols; *v)* la producció de taques seguia un cicle d'onze anys. Subsistien però alguns debats molt importants com el de quina era l'edat del Sol, la seva composició química exacta i la seva font d'energia.

2 La Física Solar durant el Segle XX: Contribució a la Física i l'Astrofísica

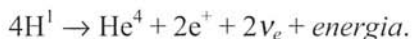
Per resoldre el debats que subsistien a principis del segle XX va ser necessari esperar el desenvolupament de la Física Atòmica i Nuclear, i de la Relativitat. L'any 1905, Einstein va escriure el següent en un dels seus articles: «*Si un cos emet una quantitat d'energia L en forma de radiació, la seva massa disminueix en L/c^2 . La massa d'un cos és una mesura del contingut d'energia*». Aquesta afirmació va suggerir a l'astrònom anglès Eddington que l'energia de les estrelles era possiblement deguda a processos subatòmics. A més a més, els experiments d'Aston (1920) varen posar de manifest que la massa d'un nucli d'hidrogen és major que la d'un nucli d'heli. Eddington va comprendre immediatament la importància de la mesura feta per Aston si un la mirava junt a l'afirmació d'Einstein. Per altra banda, a partir de 1920, el desenvolupament de la Física Atòmica va permetre deduir les abundàncies dels elements químics a les estrelles a partir dels seus espectres. Aquesta tasca va ser duta a terme de forma exhaustiva per Payne (1925) qui a la seva tesi doctoral va concloure que l'atmosfera solar, i en general l'atmosfera de totes les estrelles, estava composta fonamentalment per hidrogen i heli. Malgrat aquest resultat, Eddington (1926) encara defensava que el Sol era una barreja fortament ionitzada dels mateixos elements que hi ha a la Terra i que l'energia es generava al centre de l'estrella mitjançant un procés subatòmic a una temperatura de 40 milions de graus. Anys més tard, Eddington i Strömgren (1932) arribaren a la conclusió de que l'hidrogen és molt abundant a l'interior de les estrelles i que els seus elements químics són els mateixos que trobam a la Terra, però en unes proporcions totalment diferents (74% hidrogen, 24% heli i un 2% barreja de

tots els altres elements). Strömngren (1938) va arribar finalment a la conclusió de que la temperatura central del Sol era d'uns 15 milions de graus.

S'obria d'aquesta manera la porta per entendre el mecanisme de generació d'energia a les estrelles. El coneixement de l'abundància química estel·lar juntament amb la relació massa-energia va fer que Eddington proposàs la fusió de nuclis d'hidrogen per generar l'energia estel·lar. Però, encara restaven alguns detalls per resoldre: Per exemple, com podien dos nuclis d'hidrogen fusionar-se si la força elèctrica entre ells era de rebuig. Al voltant de 1928, Gamow, Atkinson i Houtermans varen iniciar els seus estudis sobre penetració de barreres de potencial coulombià i varen arribar a la conclusió de que l'existència de l'efecte túnel proporcionava una possibilitat no nul·la de penetració. L'any 1938, Weizsäcker va proposar un cicle de reaccions que involucrava el carboni, l'oxigen i el nitrogen (cicle CNO) per explicar la generació de l'energia estel·lar. El balanç final d'aquest cicle és:



amb el carboni actuant com a catalitzador. El mateix any, Bethe i Critchfield varen proposar una cadena de reaccions per explicar la generació d'energia en el cas d'estrelles de massa petita com el Sol. El balanç final d'aquesta cadena de reaccions (la cadena p-p) és



Com a resultat d'aquestes reaccions, cada segon desapareixen al centre del Sol 600 milions de tones d'hidrogen i es formen 595 milions de tones d'heli. En conseqüència, 5 milions de tones d'hidrogen es transformen en energia. El Sol emet cada segon un trilió de vegades el consum elèctric bimensual típic d'una llar, és a dir, el Sol emet en un segon més energia que la gastada per la Humanitat al llarg de la seva història. Amb aquest ritme, el Sol encara es mantindrà en el seu estat actual uns cinc mil milions d'anys!

Però, com podem estar segurs que aquest és, efectivament, el mecanisme de generació d'energia que utilitzen les estrelles? Senzilla i curiosament perquè podem *observar* l'interior del Sol amb experiments situats a l'interior de la Terra! L'any 1960, Bahcall i Davis varen suggerir que es podien *observar* les reaccions de fusió a l'interior del Sol a partir de la detecció dels neutrins que produïen. Davis va atacar el problema mitjançant una tècnica proposada per Pontecorvo l'any 1946 i que consistia en utilitzar detectors radioquímics. L'idea era col·locar una gran quantitat de matèria en el camí dels neutrins perquè algun d'ells interactuàs amb ella. La matèria que Davis

feia servir era un compost de clor on, per interacció d'un neutrí amb un àtom de clor, es produïen àtoms d'argó radioactiu. Els primers resultats de l'experiment fets públics l'any 1968 suggerien que es detectaven un 30% de neutrins menys dels esperats. La confirmació de que hi havia un problema seriós amb el nombre de neutrins detectats es va fer 20 anys més tard en un altre experiment, Kamiokande, que funcionava de forma totalment diferent al detector de Davis: L'any 1989, l'experiment Kamiokande va confirmar que el nombre de neutrins detectats era inferior a l'esperat i es va veure que era necessari confirmar si el dèficit afectava a tots els neutrins o tan sols als d'alta energia. Altres dos experiments radioquímics, SAGE i GALLEX, varen confirmar a principis dels anys 1990 que també mancaven neutrins de baixa energia. Havia comparegut l'anomenat problema dels neutrins solars.

Els raigs còsmics d'alta energia interaccionen amb nuclis a l'atmosfera terrestre i produeixen neutrins muònics i electrònics en proporció de dos a un; però experiments fets pels detectors IMB i Kamiokande varen mesurar més o manco el mateix nombre de neutrins de cada tipus. L'any 1998, Superkamiokande, experiment germà de Kamiokande però de mida major, va confirmar la realitat del problema amb els neutrins atmosfèrics. En particular, Superkamiokande va comparar mesures de neutrins que venien de l'atmosfera per damunt de la seva instal·lació amb mesures de neutrins que venien de l'altre costat de la Terra. Per a les mesures de dalt es va trobar la relació 2:1, per a les de baix es trobaren menys neutrins muònics. Semblava, doncs, que hi havia una conversió de neutrins muònics en neutrins electrònics. Aquesta possibilitat de canvi de caràcter dels neutrins va ser suggerida per Pontecorvo l'any 1967 i s'anomena oscil·lació dels neutrins. Fins aquell moment, els experiments eren sensibles exclusivament a neutrins electrònics, però no a neutrins tauònics o muònics. Per tractar d'arreglar-ho, es va construir el detector SNO on es podien produir dos tipus de reaccions, una sensible als neutrins electrònics i l'altra a tots tipus de neutrins. Entre 2001 i 2002 es varen obtenir els primers resultats. L'experiment sensible a tot tipus de neutrins detectava el flux esperat, mentre que l'experiment sensible als electrònics detectava una minva. Aquestes mesures resolien el problema: el Sol genera neutrins electrònics però en el seu camí fins a nosaltres alguns canvien de caràcter (a tauònic o muònic) i es tornen indetectables si un no disposa d'experiments adients. Per tant, el Sol i les estrelles de baixa massa generen energia mitjançant el cicle p-p, i les de massa elevada utilitzen el cicle CNO.

Com a conseqüència dels experiments, ha resultat que el neutrí té massa i, per tant, el model estàndard de partícules elementals haurà de ser modificat

(la seva massa és petita i no permet explicar la matèria fosca de l'univers). Quan en Davis va proposar el seu experiment, un dels censors va dir que era semblant a mesurar la distància a la Lluna estirant la mà pujat a una escala!

a) Heliosismologia

L'any 1960, Leighton va descobrir que el Sol oscil·lava amb un període de 5 minuts. Anys després, Ulrich va proposar explicar l'oscil·lació en termes d'ones sonores atrapades en cavitats ressonants davall de la superfície solar, teoria que va ser comprovada observacionalment el 1975 per Deubner. Els diferents modes d'oscil·lació penetren fins més o menys profunditat dins el Sol i aquest fet permet fer un sondeig sísmic de l'interior solar semblant al que fem a la Terra utilitzant les ones generades per els terratrèmols. Alguns resultats interessants d'aquest sondeig sísmic són la determinació de la profunditat de la zona convectiva, la velocitat del so a l'interior solar i la velocitat de rotació del Sol en funció del radi. Experiments com GOLF i VIRGO embarcats en el satèl·lit d'observació solar SOHO permeten observar modes del Sol arribant fins al nucli i, aplicant mètodes d'inversió, es pot obtenir la velocitat del so a l'interior (depenent de la temperatura i composició química), comparar-la amb l'obtinguda a partir de models numèrics, i comprovar que el grau de concordància és molt bo.

La rotació solar produeix una separació de freqüències i, si es determina observacionalment aquesta separació, es pot obtenir el perfil de rotació de l'interior solar. Els resultats suggereixen que el nucli solar rota rígidament amb la zona radiativa amb un període de 26.6 dies i que a la base de la zona de convecció existeix una forta transició de rotació rígida a rotació diferencial. L'heliolismologia ens permet obtenir informació acurada de l'interior solar i, al comparar-la amb els nostres models teòrics, posa de manifest que el nostre coneixement de l'interior solar és força acurat.

b) El Sol com a lent gravitatòria

L'any 1801, Soldner va fer ús de la gravitació Newtoniana per calcular la desviació soferta per un raig de llum provenint d'una estrella que passes prop del Sol (lent gravitatòria). L'any 1915, Einstein va suggerir que la presència de massa deforma l'espai-temps i, per tant, la trajectòria d'un raig de llum és corbada i aquesta desviació, calculada amb la relativitat general, és dues vegades la d'en Soldner. Per poder comprovar la realitat d'aquest efecte, els astrònoms anglesos varen organitzar dues expedicions (a Sobral i

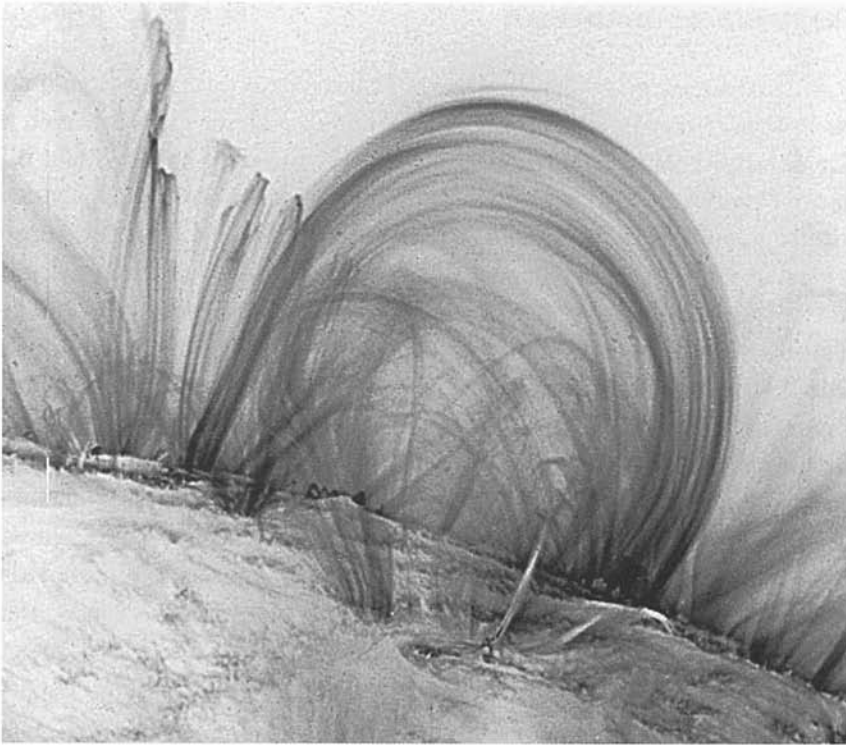


Figura 1: Avui s'obtenen imatges excel·lents del Sol, algunes captant llum de longituds d'ona que no penetren l'atmosfera terrestre i s'han de prendre des de l'espai. Aquesta és una imatge del TRACE a la banda del ultraviolat extrem que mostra un conjunt de llaços coronals. La mida dels llaços pot superar els dos cents mil quilòmetres (Fotografia virada per a aquesta publicació a partir d'un original cortesia de M. Aschwanden *et al.* LMSAL, TRACE, NASA).

Figure 1: Very good images of the Sun can be obtained today. Some of them record the light with a wavelength that can not penetrate the Earth atmosphere and must be taken from the space. This is an image recorded by TRACE in extreme ultraviolet light showing a cluster of coronal loops. The size of the loops can be larger than two hundred thousand kilometers (Picture treated for this book from an original picture courtesy of M. Aschwanden *et al.* LMSAL, TRACE, NASA).

Príncep) per observar l'eclipsi total de Sol del 29 de maig de 1919. Durant la totalitat, el Sol seria tot just davant el cúmul de les Hyades i es podria obtenir una fotografia de les posicions de les estrelles del cúmul a comparar amb una altra obtinguda sis mesos després. El desplaçament a mesurar era equivalent al diàmetre d'una bombeta vista des de 12 km! El resultat obtingut va recolzar la teoria d'Einstein. El Sol va ser la primera lent gravitatòria utilitzada per comprovar una teoria física. Avui en dia, les lents gravitatòries (en forma de galàxies o cúmuls de galàxies) són utilitzades per estudis cosmològics, de matèria fosca, estructura i evolució galàctica, etc.

c) Física Solar des de l'espai

A l'acabament de la Segona Guerra Mundial, els americans varen confiscar i portar als Estats Units tot el material que els alemanys utilitzaven per fer les bombes volants V2 que encara permetia construir-ne al voltant d'un centenar. Aquestes V2 varen servir per iniciar l'estudi del Sol a bandes de l'espectre que no es podien assolir des d'en terra. L'any 1945, Goldberg va començar a fer espectroscòpia del Sol des de fora de l'atmosfera, i entre 1946 i 1947 varen ser llançades 28 V2 (una vintena per damunt dels 100 km) amb instruments per fotografiar l'espectre ultraviolat del Sol. Degut a l'incertesa del sistema de recollida de les observacions només es varen obtenir cinc resultats positius. L'any 1949, Friedmann va introduir mètodes electrònics de detecció amb l'avantatge de que les mesures es podien enviar per telemetria. Es va observar per primera vegada la intensa emissió del Sol en raigs X al voltant de 8 \AA i a l'ultraviolat a la regió Lyman α , que era impossible d'observar des d'en terra degut a l'absorció de la radiació ultraviolada a les capes superiors de l'atmosfera. Finalment, i per primera vegada, l'any 1955, Friedman i col·laboradors varen observar el cel de nit i varen detectar fonts de radiació ultraviolada. Acabava de néixer l'Astronomia Espacial (Fig. 1).

d) Activitat i vent solar

Les observacions en la línia $H\alpha$ fetes per Hale (1908) al voltant de les taques solars varen posar de manifest que la forma de les estructures observades recordava la distribució que adopten les llimadures de ferro dins un camp magnètic (Fig. 2). A més a més, els espectres de les taques solars mostren l'anomenat efecte Zeeman (1896): el desdoblament de les línies espectrals sensibles al camp magnètic. Aquest efecte permet calcular el camp magnètic a una taca solar que resulta ser de l'ordre de 3000 Gauss. Posteriorment, Hale va estudiar la polaritat de les taques solars i va redefinir el cicle solar en termes d'un cicle magnètic de 22 anys, més fonamental que el d'11.

Des de mitjans segle XIX (Maunder, 1904; Chapman, 1929, 1940) hi havia evidències de que el Sol ejectava matèria cap a l'espai interplanetari, produint pertorbacions del camp magnètic de la Terra amb un període de 27 dies (coincident més o manco amb la rotació solar) i que eren més intenses als pols terrestres. Una altra evidència va ser proporcionada per Biermann (1951) qui va cridar l'atenció sobre l'orientació de la coa dels cometes que podia ser deguda al flux de material solar. L'any 1958, Parker va proposar

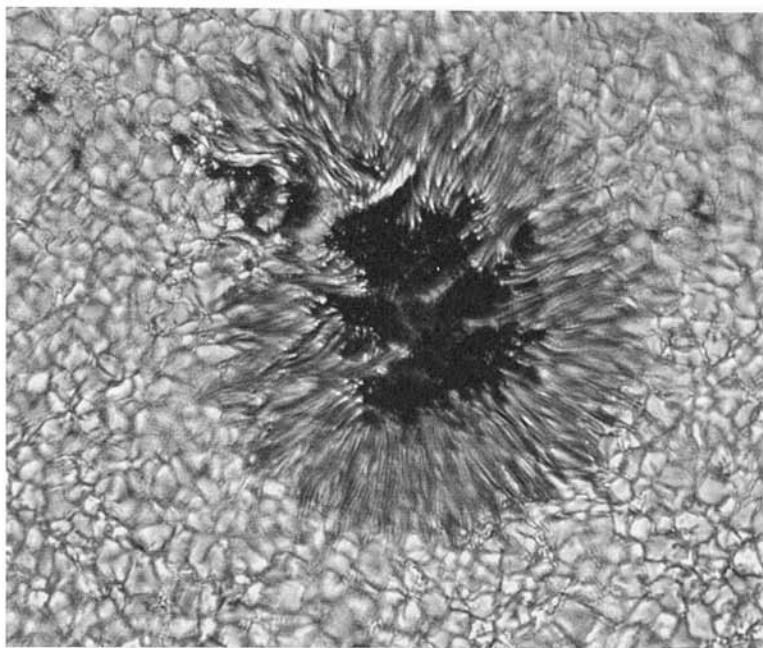


Figura 2: Imatge d'una taca solar. El camp magnètic del Sol impedeix que material calent arribi a una regió que queda més freda que els voltants i apareix com a fosca perquè emet menys radiació. Es veuen també les cel·les convectives de gas calent (grànuls) que tenen un diàmetre mitjà de mil quilòmetres (Cortesia de *Vacuum Tower Telescope*, NSO, NOAO).

Figure 1: Picture of a sunspot. The Sun's magnetic field prevents hot material arriving to a region, which becomes cooler than the surroundings and appears darker because it emits less radiation. There appear the convective cells of hot gas (granules) whose mean diameter is one thousand kilometers. (Courtesy: Vacuum Tower Telescope, NSO, NOAO).

que la corona solar sofria una expansió hidrodinàmica, teoria que era compatible amb les altes temperatures de la corona, entre dos tres milions de graus, suggerides per Grotrian i Edlén a 1934. La teoria d'en Parker va ser mal rebuda i la seva publicació va sofrir greus problemes amb els censors encarregats del seu article. Finalment, l'article va ser acceptat després de converses amb l'editor, el famós Chandrasekhar. En qualsevol cas, per confirmar o no la teoria es necessitaven mesures des de l'espai. Poc temps després, Gringauz i col·laboradors (1960) varen donar a conèixer els resultats de l'experiment embarcat a la nau soviètica Lunik 2 dient que «*l'emissió corpuscular del Sol ha estat observada per primera vegada a l'espai interplanetari*». A continuació, l'Explorer 10 (1961) també va mostrar evidències de l'existència del vent solar i el Mariner (1962) en va confirmar finalment l'existència, donant suport a la teoria de Parker. Parker va ser promogut a *full professor* a Chicago amb el suport de Chandrasekhar, que al principi dubtà

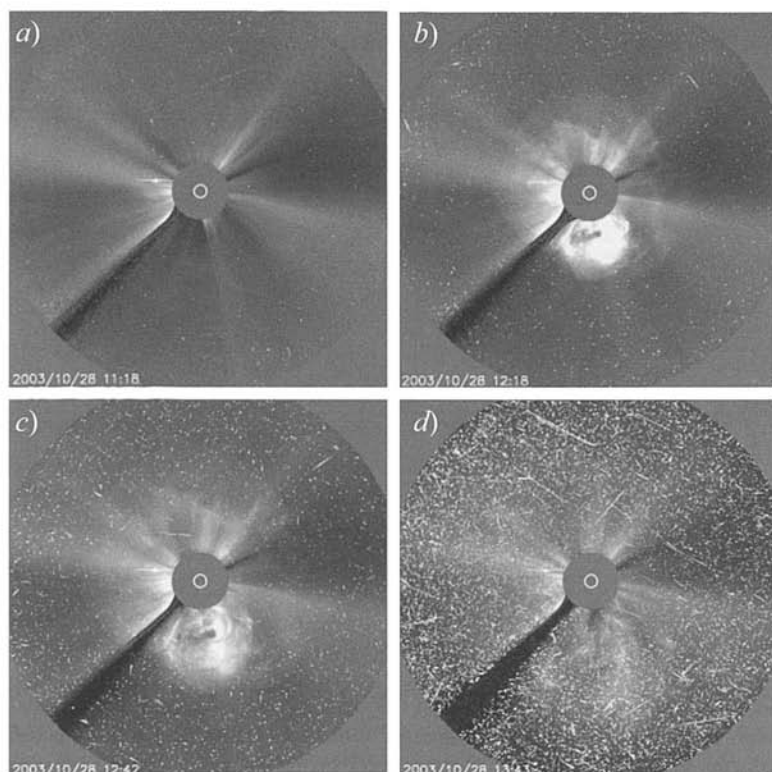


Figura 3: Imatges del coronògraf del SOHO preses el dia 28 d'octubre de 2003 (el disc blanc central correspon al Sol). *a)* Corona solar a les 11:18h. *b)* Ejecció de massa coronal produïda a les 12:42h. *c)* Evolució de l'ejecció a les 13:43h. *d)* Les traces estan produïdes pel xoc dels protons solars sobre el detector CCD de la càmera. (Cortesia de SOHO/LASCO consortium ESA, NASA).

Figure 1: Pictures of the SOHO coronagraph captured in October 28, 2003 (the white central disc corresponds to the Sun). *a)* Solar corona at 11:18h. *b)* Coronal mass ejection produced at 12:18h. *c)* Evolution of the ejection at 12:42h. *d)* The speckles are produced by solar protons striking to coronagraphs CCD camera. (Courtesy of SOHO/LASCO consortium, ESA, NASA).

de la seva teoria. La detecció del vent solar va significar la primera detecció des de l'espai d'un vent estel·lar, un fenomen molt comú dins l'Astrofísica.

El posterior desenvolupament de l'observació del Sol utilitzant naus espacials ha servit per conèixer el Sol i l'activitat solar des de perspectives molt diferents i amb un detall mai somniat fa ara tan sols trenta anys quan alguns de nosaltres acabaven els nostres estudis universitaris. L'any 1975, Skylab va mostrar al món la corona solar en tot el seu esplendor i fenòmens mai vists com les ejeccions de massa coronal. Les ejeccions de massa coronal, igual que les fulguracions, tenen una gran influència sobre la Terra. Amb

les ejeccions de massa coronal s'emeten milers de milions de tones de material ionitzat amb velocitats de fins a milers de quilòmetres per segon (Fig. 3). Sortosament, la Terra disposa d'un escut contra aquestes pertorbacions: el seu camp magnètic. No obstant, algun material encara arriba: les partícules que atravessen l'escut magnètic terrestre provoquen les espectaculars aurores a latituds altes prop dels pols. Per la seva banda, les fulguracions grosses envien electrons i protons a la velocitat de la llum. Les conseqüències poden ser greus: danys als equips electrònics dels satèl·lits; creixement del fregament dels satèl·lits amb l'atmosfera per la seva expansió; problemes amb els sistemes de navegació (Loran-C, GPS); augment de la dosi de radiació absorbida pels astronautes, tripulació i passatgers d'avions en vols transpolars a gran altura; problemes amb els sistemes de comunicació ràdio AF (la força aèria dels Estats Units finança observatoris d'alerta i predicció des de fa molts d'anys i informacions extraoficials diuen que després de les superfulguracions de finals de 2003 (vegeu Fig. 3), EUROCONTROL va perdre durant cinc minuts els avions que volaven sobre Europa); problemes en les operacions dels oleoductes (els camps geomagnètics fluctuants indueixen corrents elèctrics produint que els mesuradors de flux donin informacions errònies, que l'envelliment dels materials augmenti, etc.); i es produeixen corrents elèctrics a l'atmosfera que poden pertorbar les xarxes de distribució d'electricitat (apagada a Quebec el març 1989 amb 6 milions de persones afectades).

La meteorologia espacial ha esdevingut un àrea de molt d'interès per la seva importància científica, econòmica i estratègica i, hores d'ara, hi ha molts d'organismes dedicats a la vigilància del temps espacial, entre d'altres: *The NASA Space Weather Bureau*, *Space Environment Center* (NOAA) i *ESA Space Weather*.

3 Conclusions i perspectives de futur

El Sol és un *laboratori* per a físics i astrofísics on estudiar un gran nombre de processos diferents com la fusió nuclear, els neutrins, l'efecte de lent gravitatòria, el confinament de plasmes per camp magnètic, l'extrapolació de l'activitat solar a altres estrelles, etc. Al mateix temps, els estudis del Sol han estat pioners per a altres camps de l'Astrofísica com ara l'astronomia des de l'espai, l'astronomia ultraviolada, de raigs X, de neutrins, etc.

Malgrat tots els avanços que s'han produït durant els darrers cent cinquanta anys en el nostre coneixement del Sol, encara queden qüestions

obertes per resoldre, moltes d'elles enllaçades amb l'astrofísica estel·lar. Algunes de les qüestions obertes són perquè es dona l'escalfament de la corona solar i com són les estructures coronals de les estrelles; com aconseguir un millor coneixement de l'interior del Sol mitjançant l'heliòsismologia i, en general, com desenvolupar l'asterosismologia per sondejar sísmicament altres estrelles, quin és el mecanisme responsable de l'activitat del Sol i de les estrelles; o com és l'estructura tridimensional del vent solar i com es poden aplicar aquests coneixements als vents estel·lars.

Molts dels reptes posats per aquestes qüestions podran ser assolits mitjançant nous telescopis en terra i a l'espai en vies de desenvolupament o que seran desenvolupats i llançats en els propers anys. Entre ells podem citar el telescopi *ATST* (2009-2010) que s'instal·larà a Hawaii; el satèl·lit japonès *Solar B* (2006) que observarà el Sol a l'òptic, raigs X i ultraviolat extrem; *Stereo* (2006), dos satèl·lits de NASA per a l'ultraviolat extrem, dotats de coronògraf i que permetran una visió tridimensional de les estructures coronals; *SDO* (2008), també de NASA, capaç de fer observacions a l'ultraviolat extrem i heliosísmiques; i finalment, *Solar Orbiter* (2013) de l'ESA que s'acostarà fins a 0.2 UA del Sol, tot un repte.

Dins un termini d'uns quinze anys la nostra informació sobre el Sol haurà augmentat de forma espectacular i, amb tota seguretat, nous descobriments ens deixaran bocabadats i contribuiran a una major distinció de la Física Solar, perquè no oblidem que el Sol té una importància cabdal per a la humanitat, tant per la seva influència sobre la Terra com per la seva condició de *laboratori* proper on estudiar amb alta resolució fenòmens difícilment observables a altres estrelles.

Referències

- Hufbauer, K. 1991. "Exploring the Sun: Solar Science since Galileo". J. Hopkins University Press.
- Meadows, A. J. 1970. "Early Solar Physics". Pergamon Press.
- Tassoul, J. L. i Tassoul, M. 2004. "A Concise History of Solar and Stellar Physics". Princeton University Press.